

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

Ніколаєв Сергій Сергійович



УДК 004.932

**Інформаційна технологія безконтактного дистанційного
визначення варіабельності серцевого ритму людини з відеопотоку**

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі математичних методів системного аналізу Навчально-наукового комплексу “Інституту прикладного системного аналізу” Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,
Тимошенко Юрій Олександрович,
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, доцент кафедри математичних методів системного аналізу.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Антошук Світлана Григорівна,
Одеський національний політехнічний університет,
директор Інституту комп’ютерних систем;

доктор технічних наук, професор
Романюк Олександр Никифорович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри програмного забезпечення

Захист відбудеться ”4” жовтня 2019 р. о 16 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.29 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, 03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37, корпус №11, аудиторія №215.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “4” вересня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. Ф. Теленик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Серцево-судинні захворювання (ССЗ) за статистикою є першою причиною смертей в усьому світі. Через ССЗ у Європі щорічно помирає понад 4,3 мільйона людей, що складає 48% від світових показників. В Україні показник смертності від ССЗ становить 68%, саме тому проблемі ССЗ приділяється така увага.

Традиційна медицина має реактивний характер, коли пацієнти звертаються до лікаря з уже вираженими ознаками хвороби. У даній роботі автор базується на парадигмі персоналізованої, прогностичної та профілактичної медицини (ПППМ), що є глобальним трендом у ХХІ ст. і передбачає постійне спостереження за станом серця людини ще до виникнення перших проявів хвороби. Для діагностики ССЗ, на даний час медичним еталоном точності вимірювання серцевої активності є моніторинг електрокардіограми (ЕКГ) за методом Холтера, що потребує встановлення на пацієнта ЕКГ рекордера з наступною інтерактивною обробкою лікарем збережених ЕКГ. Іншим методом діагностики ССЗ є дослідження варіабельності серцевого ритму (ВСР), яка міститься у рядах RR-інтервалів, – часових проміжках між скороченнями серця.

За останні роки з'явилися різноманітні альтернативи пристрою Холтера, а саме: персональні пульсометри, «розумні» годинники та фітнес-трекери, тощо. Більшість цих пристроїв працюють на принципах фотоплетизмографії (ФПГ) та потребують контакту зі шкірою людини. Широкому розповсюдженню цих пристроїв заважає висока ціна, крім того якісь сигнали для діагностики ССЗ у багатьох випадках є незадовільною.

Значний внесок у розвиток інформаційних технологій (ІТ) отримання та аналізу ВСР зробили такі відомі вчені як Баєвський Р. М., Шликова Н. О., Панкратова Н. Д., Файнзілберґ Л. С., Павлов С.В., Андон П.І., Левандовська М., Рубінштейн М., Крістінакі Е., Верінґа Ф., Веркуйзе В., Венцінь Ванг, та ін.

У дисертації для визначення ВСР пропонується використовувати доступні широко поширені відео- та веб-камери, які наявні у більшості місць відпочинку та роботи людей. Такий спосіб безконтактного вимірювання ВСР не потребує зміни розпорядку та стилю життя людини та робить можливим постійний моніторинг ВСР. Розвиток інформаційних технологій безконтактного визначення варіабельності серцевого ритму з відео потоку потребує інтелектуального розпізнавання образів та сигналів, розподіленої обробки даних, а також використання сучасних методів аналітики, штучного інтелекту та інтернет-технологій. Завдяки цьому можливо побудувати, наприклад, абсолютно нові веб-сервіси страхової дистанційної медицини, управління персоналом, тощо.

Тому актуальною є задача розробки інформаційної технології безконтактного дистанційного визначення ВСР людини з відеопотоку веб-камер.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі методів математичного системного аналізу Інституту прикладного системного аналізу Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України, в рамках пріоритетного наукового напрямку, затвердженого в числі

актуальних проблем Міністерством освіти і науки України, "1.2.2.4. Розробка обчислювальних алгоритмів і процедур з метою вирішення практичних задач міждисциплінарного характеру для застосувань, що належать до науково-технічної та соціально-економічної сфер діяльності людини".

Робота направлена на вирішення задач ПППМ і відповідає завданням Європейської асоціації EPMA (European Association For Predictive, Preventive & Personalized Medicine) та європейського проекту FP7 NIMSPPS "Network for informational methods in supporting persons predisposed to preventable strokes using common devices".

Мета і задачі дослідження полягають у забезпеченні безконтактного, швидкого та достовірного способу дистанційного виявлення варіабельності серцевого ритму людини з відеопотоку за рахунок створення інформаційної технології з використанням методів комп'ютерної обробки відеосигналів у реальному часі та розповсюджених веб-камер. Для досягнення поставленої мети у дисертації вирішуються такі **завдання**:

1. Провести аналіз сучасних (без)контактних підходів визначення ВСР.
2. Проаналізувати моделі та методи побудови ІТ для отримання віддаленої фотоплетизмограми з відеопотоку звичайних веб-камер.
3. Запропонувати та розробити моделі, критерії, алгоритми та процедури безконтактного вимірювання віддаленої ФПГ та ВСР, що враховують просторову та частотну фільтрацію індукованих веб-камерами шумів.
4. Провести параметричну ідентифікацію та експериментальні дослідження якості моделей розпізнавання облич, знаходження пікселів шкіри та методів виокремлення сигналу віддаленої фотоплетизмограми. Розробити критерій Q для комплексної оцінки якості ІТ.
5. Розробити ІТ отримання ВСР людини з відеопотоку з урахуванням специфіки функціонування веб-камер та окремих компонентів.
6. Провести експериментальні заміри еталонної вибірки моментів скорочень серця методом Холтера з ЕКГ та безконтактним вимірюванням з відео за допомогою ІТ. Оптимізувати параметри розробленої системи за допомогою критерію Q на зібраних даних та оцінити її якість.
7. Провести дослідну експлуатацію розроблених методів та ІТ.

Об'єкт дослідження – процес комп'ютерної обробки відеосигналів у реальному часі для визначення варіабельності серцевого ритму.

Предмет дослідження — моделі, методи та ІТ дистанційного безконтактного отримання моментів скорочення серця людини з відеопотоку.

Методи дослідження. Для досягнення мети та вирішення задач дисертації, в роботі застосовані такі методи досліджень, як методи розпізнавання образів для знаходження облич на зображеннях і обробки відеозображень, нейромережеві методи класифікації та регресії для виявлення окремих пікселів шкіри на кадрах відео, методи сліпого поділу джерел для відокремлення шумів та компоненти освітленості від компонентів зміни відтінку кольору шкіри, методи дискретної оптимізації для контрольованого покращення якості системи, методи інтерполяції та фільтрації нерівномірно дискретизованих багатовимірних часових рядів для

подавлення шумів, методи теорії ймовірності та математичної статистики для оцінки статичних параметрів розподілів RR-інтервалів у інформаційних індексах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

Вперше запропоновано програмний метод амплітудно-диференціальної корекції сигналу віддаленої фотоплетизмограми на основі комп'ютерного аналізу динаміки зміни відтінків шкіри у часі, що дозволяє позбутися розривів сигналу при зміні внутрішніх станів веб-камери.

Подальшого розвитку отримав метод ймовірнісного детектування пікселів шкіри у вигляді нейронної мережі на основі радіально-базисних функцій, що відрізняється від існуючих використанням незалежної від освітленості проекційної площини, та дає можливість оцінювання ймовірності приналежності кожного пікселя зображення до шкіри.

Запропоновано новий критерій оцінювання подібності двох різновимірних послідовностей подій і відповідний метод обчислення їх схожості на підставі розбиття подій у цих послідовностях на класи еквівалентності, що дозволяє оцінювати точність знаходження моментів скорочення серця.

Вперше створено інформаційну технологію безконтактного визначення варіабельності серцевого ритму, особливість якої полягає у використанні для дистанційного безконтактного моніторингу стану людини, розподіленій обробці даних, інтелектуальному розпізнаванні образів, можливістю реалізації на доступних технічних засобах (звичайних веб-камерах) і досягненні обґрунтованого рівня точності.

Практичне значення отриманих результатів. На базі запропонованих методів розроблено алгоритми та програмні засоби для безконтактного знаходження ВСР, зокрема: програмний модуль ймовірнісного детектування шкіри; алгоритм амплітудно-диференціальної корекції сигналу відтінків шкіри; програмний комплекс безконтактного визначення варіабельності серцевого ритму з веб-камер на базі Linux з використанням мови Python; інструментальний комплекс для відтворення експериментів з відеозаписами та відповідними ЕКГ, що дозволяє багаторазово налаштовувати ІТ з різними параметрами для покращення її якості, без необхідності проведення повторних експериментів.

Розроблені програмні засоби дозволили побудувати ІТ, що може бути використана для систем безконтактного моніторингу ВСР людини у її повсякденному житті та роботі. Застосовуючи спеціальні медичні індекси, розроблена ІТ дозволяє створити ряд нових інструментів моніторингу стану людини для аналізу впливу різних факторів на неї. Прикладами цільових груп є клієнти та працівники банків, страхових та ІТ компаній, пілоти літаків, машиністи та водії транспорту, тощо. ІТ дозволяє розширити можливості дистанційної медицини, що особливо актуально для віддалених сільських місцевостей.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у Київській міській клінічній лікарні №6 і на кафедрі математичних методів системного аналізу (ММСА) Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Математичні моделі та алгоритми розпізнавання образів, машинного навчання та обробки сигналів використовуються в лекційних матеріалах дисциплін «Архітектури та функціонування комп'ютерних систем» та

«Соціальні та етичні проблеми ІТ», у курсовому та дипломному проектуванні кафедри ММСА.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, що виносяться до захисту, отримані особисто. В наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить:

розробка алгоритму та критерію подібності двох різновимірних послідовностей подій [1]; розробка архітектури нейронної мережі та способу відбору інформативних ознак [2]; побудова детектора облич та дослідження його якості залежно від компонування навчальної вибірки [3]; дослідження застосовності сучасних монокулярних методів 3Д реконструкції облич для покращення зняття сигналу серцебиття [4]; побудова алгоритму фільтрації для розмітки R-піків на кардіограмах [5]; проведення аналізу впливу різних факторів, таких як тип несправностей та їх складність, рівень стресу та втома персоналу на кількість трудових зусиль необхідних для вирішення сервісних інцидентів у центрах обробки даних [6]; аналіз проблем сучасної медицини та задач ППІМ [7].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації розглядалися та обговорювалися на наступних міжнародних науково-технічних конференціях:

17-th International conference on System Analysis and Information Technology SAIT (Kyiv, 22–25 June 2015p.); III Міжнародна науково-практична конференція «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи) – 2015» (ComInt-2015) (Черкаси, 12-15 травня 2015 p.); 18-th International conference on System Analysis and Information Technology SAIT (Kyiv, 30 May – 2 June 2016p.); V Всеукраїнська науково-практична конференція «Наукові дослідження: перспективи інновацій у суспільстві та розвитку технологій» (Харків, 14-15 березня 2017 p.); 19-th International conference on System Analysis and Information Technology SAIT (Kyiv, 22–25 May 2017p.); XIII Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2017)» (Залізний Порт, 22–26 травня 2017); V Міжнародна науково-практична конференція «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні 2017» (Київ, 22-23 червня 2017); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ-ОДЕСА-2017) (Одеса, 20 – 22 вересня 2017); 20-th International conference on System Analysis and Information Technology SAIT (Kyiv, May 21–23, 2018); 3rd Conference on Information Technology, Systems Research and Computational Physics, ITSRCР (Poland, Cracow, 2-5 July 2018).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 4 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 15 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел на 89 найменувань, 6 додатків. Повний обсяг дисертації складає 197 сторінок, із них 151 сторінка основного тексту. Робота містить 98 рисунків і 5 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі роботи, об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про впровадження результатів дисертації, публікації і особистий внесок автора.

Перший розділ присвячений аналізу технологій знаходження варіабельності серцевого ритму людини. Показано та обґрунтовано необхідність зміни парадигми традиційної відстроченої реактивної та інтервенційної медицини на персоналізовану, прогностичну та профілактичну медицину, яка передбачає постійне спостереження та автоматичний аналіз стану здоров'я кожної людини задовго до виникнення негативних змін. Це потребує постійного моніторингу ВСР людини за допомогою широко доступних засобів. Розкривається сутність і особливості задачі дистанційного знаходження ВСР людини та здійснюється огляд існуючих технологій і спеціалізованих комерційних пристроїв зняття різних кардіосигналів, таких як ЕКГ, ЧСС, RR-інтервалів і ВСР. Описується технологія плетизмографії, та зокрема дистанційної фото плетизмографії, як альтернативний спосіб отримання ВСР. Досліджуються основні невирішені задачі та різні відомі способи отримання та аналізу сигналу дистанційної ФПГ, а також методи подавлення шумів у ФПГ. Проводиться огляд методів і моделей необхідних для побудови інформаційної технології отримання віддаленої ФПГ. Сформульовано мету та задачі дослідження.

У **другому розділі** запропоновано концепцію, розроблено критерії та проаналізовано базові моделі та методи побудови інформаційної технології дистанційного моніторингу ВСР. Визначено основні етапи комп'ютерної обробки інформації для знаходження дистанційної фотоплетизмограми. Джерелом сигналу серцебиття у даній роботі є зміна відтінку шкіри внаслідок варіації концентрації та спектральних властивостей насиченої киснем крові при кожному скороченні серця. Обличчя людини має достатню площу тонкої шкіри та є зручним об'єктом для зняття сигналу серцебиття. Відповідно, першим етапом є побудова детектора обличчя, який вирішує задачу знаходження координат прямокутників мінімального розміру, що містять у собі по обличчю з вхідного зображення розмірів $W \times H$ пікселів. У розділі проведено аналіз різних структур даних для знаходження обличчя на кадрі, включаючи інтегральні зображення, локальні бінарні шаблони, ознаки Хаара, каскади слабких класифікаторів та ін. В якості детектора фронтальних обличчя використано каскад Хаара, через його швидкість і точність. Після знаходження обличчя, наступним етапом є отримання сигналу зміни відтінків шкіри, його рівномірна редискретизація, диференційно-амплітудна корекція та подальша частотна фільтрація шумів. Далі детально описано кожен з цих етапів.

Методи редискретизації та частотної фільтрації. Так, як кадри з відеокамери отримуються через неоднакові проміжки часу, і для кожного кадру, отриманого у момент часу t , розраховується одне значення ряду $s^*(t)$ відтінків шкіри обличчя, то перед частотною фільтрацією потрібно спочатку рівномірно передискретизувати вихідний нерівномірно дискретизований ряд $s^*(t)$. Необхідно у якості методів редискретизації використовувати ті, що можуть працювати в реальному часі, та які не спотворюють форму сигналу $s^*(t)$. У роботі розглянуто

три основні методи: інтерполяція кубічними сплайнами, sinc оптимальна та лінійна інтерполяції. З урахуванням специфіки залишкових шумів і форми сигналу $s^*(t)$ встановлено, що лінійна інтерполяція вносить найменшу кількість спотворень сигналу. Частота дискретизації вхідного сигналу $s^*(t)$ змінюється у межах від 5Гц до 30Гц, після редискретизації, отримується сигнал s^* з константною частотою 30Гц. Для позбавлення ряду значень s^* від рівнів освітленості обличчя, значення проєціюються на площину, незалежну від освітленості, даючи ряд спроеційованих відтінків шкіри. Далі до них застосовуються частотні смугові фільтри, що залишають частоти у діапазоні від 30 скорочень серця на хвилину до 200 скорочень/хв та дають віддалену ФПГ. У дисертації були розглянуті фільтри ковзного середнього, Бесселя, Баттерворта та Чебишева, а також описано побудову частотного кінцевоїмпульсного фільтра по заданій специфікації.

Для розрахунку ВСР з сигналу віддаленої ФПГ необхідно знайти ряд подій, – моментів скорочення серця (R-піків) у часі, що породжує дві задачі: оцінити які події знайдені коректно та статистичні характеристики розходження у часі між коректно знайденими подіями. Для вимірювання якості знаходження моментів часу скорочень серця у дисертації проводилися паралельні заміри ЕКГ методом Холтера і ФПГ розробленою ІТ. Послідовність $A = \{t_{a,i}\}_{i=1..K}$ моментів скорочень серця, виділена з записаної ЕКГ є еталоном якості по відношенню до послідовності $B = \{t_{b,i}\}_{i=1..M}$, отриманої з віддаленої ФПГ за допомогою ІТ.

У роботі запропоновано критерій Q і метод розрахунку подібності послідовностей A і B , що полягає у наступному: Назвемо подію $z \in B$ «нормальною», якщо їй відповідає еталонна подія $z \in A$. Позначимо множину нормальних подій через Z . Подію $z \in A$ назвемо *пропуском* в B , якщо ця подія не присутня в B . Подію $z \in B$ назвемо *зайвою* (помилкове спрацювання методу), якщо ця подія не присутня в A . У загальному випадку $K \neq M$. Це означає, що у B присутні зайві або пропущені події. Подію $t_{b,j}$ будемо називати *відповідною* (\sim) події $t_{a,i} = z$, якщо $t_{b,j}$ має мінімальну відстань δ_i до події $t_{a,i}$ у порівнянні з відстанями до $t_{a,i-1}$ та $t_{a,i+1}$, а також не існує інших подій $t_{b,k}$, для яких відстань до $t_{a,i}$ була б меншою, ніж δ_i . На рисунку 1 білі та штриховані ділянки показують зони приналежності часових інтервалів відповідним еталонним подіям z_i з A і B .

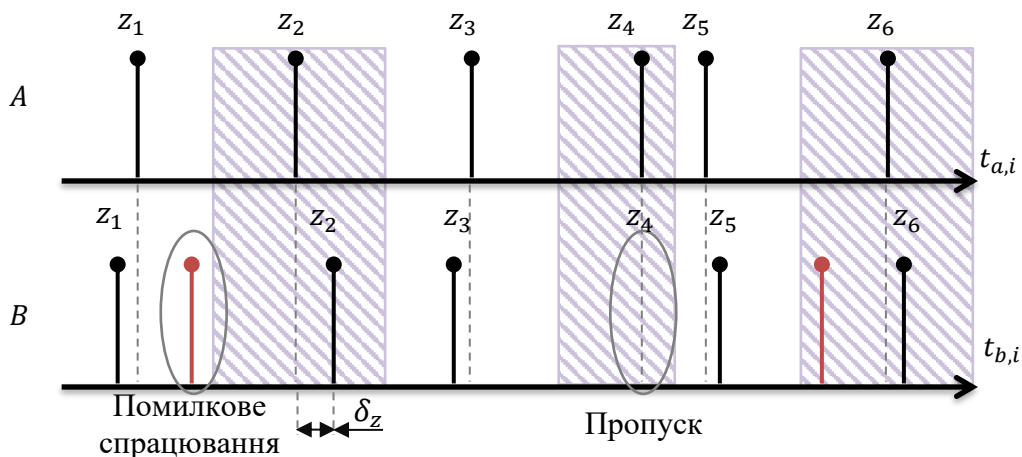


Рисунок 1 – Відповідність еталонних подій з послідовності A подіям у B

Нехай $K = M$ і у B немає пар хибних ідентифікацій подій. Тоді середнє відхилення моментів виникнення подій у часі має вигляд:

$$RMSE_Z(A, B) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{Card(Z)} |\delta_{z_i}|^2}{Card(Z)}}, \quad (1)$$

де $Card(Z)$ – кількість нормальних подій у Z . Чим менше значення цього критерію, тим точніший метод. Позначимо Асс (Ассурасу) – точність знаходження множини нормальних подій:

$$Acc(A, B) = \frac{TP}{K + FN}, \in [0, 1] \quad (2)$$

де K – загальна кількість еталонних подій в A ; TP (*true positives*) $\in [0 \dots K]$ – кількість нормальних подій у B по відношенню до A . ($TP = Card(Z)$); FN (*false negatives*) $\in [0 \dots K]$ – кількість пропусків. Чим ближче даний критерій до одиниці, тим точніше метод. Узагальнюючи випадки, описані вище, отримуємо критерій для оцінки якості методу по заданим двом послідовностям A та B :

$$Q(A, B) = \frac{Acc(A, B)}{1 + \alpha RMSE_Z(A, B)} \in [0, 1], \quad (3)$$

де $\alpha \in [0 \dots +\infty)$ – параметр, що задає важливість визначення моментів часу виникнення нормальних подій у порівнянні до точності визначення самої множини нормальних подій Z . Чим більше значення Q , тим послідовність B більш схожа на послідовність A , тому цей критерій потрібно максимізувати.

Основна ідея розрахунку критерію Q полягає у визначенні множини нормальних, пропущених і зайвих подій, а саме, щоб для кожного елемента $t_{a,i}$ з A знайти часовий інтервал $\left[\frac{t_{a,i-1} + t_{a,i}}{2}, \frac{t_{a,i+1} + t_{a,i}}{2}\right]$ і у ньому визначити найближчу до $t_{a,i}$ подію $t_{b,j}$ з B . Знайдені таким чином події $t_{b,j}$ сформують множину нормальних подій Z . Усі події, які не належать Z , але належать отриманим часовим інтервалам, – сформують множину зайвих подій. Множина $t_{a,i}$ у чії часові інтервали не потрапили події з B – сформує множину пропусків. Такий механізм дозволяє оцінити точність ІТ, завдяки експериментально отриманим еталонним послідовностям R-піків із записаних ЕКГ.

Третій розділ присвячено розробці алгоритмів та процедур реалізації системи безконтактного дистанційного визначення ВСР людини з відеопотоку. Запропоновано структуру конвеєра для виявлення моментів окремих скорочень серця з відео потоку шляхом аналізу зміни відтінку шкіри обличчя людини у часі. Конвеєр складається з послідовності процесів обробки відеопотоку: детектування обличчя на кадрі, просторової фільтрації зображень облич за допомогою ймовірнісного детектора пікселів шкіри для виділення часового ряду відтінків шкіри, проєціювання цього ряду на незалежну від освітленості площину та подальшої амплітудно-диференційної корекції, редискретизації та частотної фільтрації ряду спроеційованих відтінків шкіри, з отриманням сигналу віддаленої ФПГ, а також розмітки моментів скорочень серця на ФПГ. У даному розділі детально описано кожен з модулів та відповідні процеси.

Для отримання детектора облич із заданими характеристиками якості, показано повну процедуру збору та підготовки тренувальної вибірки облич і фону для каскаду Хаара, що виступатиме у ролі детектора облич, а також використано

методику бутстрепінга, для подальшого ітеративного покращення якості каскаду алгоритмом Адабуст. Отриманий каскад складається з 25 етапів зі зростаючою кількістю ознак (2 ознаки перевіряються на першому етапі та 218 ознак – на останньому), що зумовлює низький рівень помилкових спрацювань та швидке обчислення. Результуючий детектор натреновано на вибірці з 35 200 фронтальних облич і 60 000 зображень фону, кожне розміром 20x20 пікселів.

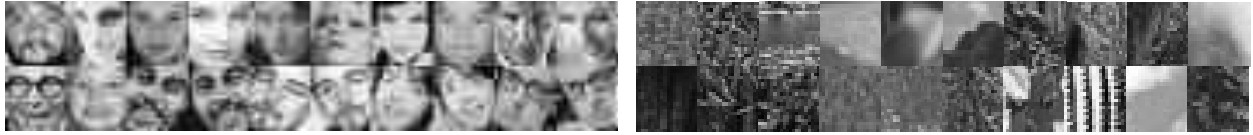


Рисунок 2 – Приклади зображень (зліва обличчя, справа фон) з тренувальної вибірки детектора облич

Якість натренованих каскадів класифікаторів перевірялася на тестовій вибірці з 7000 облич і 3400 зображень фону. Показники якості натренованого класифікатора, який використовується у роботі:

Правильно класифікованих: облич – $tp = 6953$, фонів – $tn = 3372$.

Неправильно класифікованих: облич – $fp = 47$, фонів – $fn = 28$

Таблиця 1 – Показники якості натренованих каскадів Хаара

$precision = \frac{tp}{tp + fp}$	$recall = \frac{tp}{tp + fn}$	$accuracy = \frac{tp + tn}{tp + fp + tn + fn}$
0.9932	0.9959	0.9927

Для знаходження облич у відеопотоці у реальному часі використано принцип уточнюючого пошуку, що дозволяє зменшити обсяг обчислень при обробці наступних кадрів, якщо на попередньому кадрі вже знайдено обличчя. Так як задача знаходження ВСР, серед критичних вимог має жорстке обмеження, щоб детектор при знаходженні відеоряду облич не вносив додаткових шумів, то використовується алгоритм стабілізації положення та розмірів рамки навколо знайденого обличчя, який відсікає випадкові зміни положення та розмірів рамки у часі. Таким чином, на виході з модуля знаходження облич, отримано відеопотік стабілізованих зображень облич людини.

Метою «просторової фільтрації» є відображення $S(I) \rightarrow R$ кожного вхідного зображення обличчя $I \in R^{N \times N \times 3}$ з відеопотоку, у одновимірне дійсне число $s^* \in R$, яке кодує відтінок шкіри. Для того, щоб пікселі фону не вносили шумів, першим етапом є застосування детектора шкіри до вхідного зображення обличчя. У роботі наведено дві процедури побудови детекторів шкіри: перша – алгоритмічне знаходження бінарної піксельної маски шкіри шляхом перетворення кольорової гами зображення у HSV (Hue-Saturation-Value) простір із застосуванням операцій «розширення» та «ерозії» для зменшення шумів між кадрами у часі; друга – заснована на методі ймовірнісного детектування пікселів шкіри у вигляді нейронної мережі на основі радіально-базисних функцій, що для пікселя з заданим кольором апроксимує ймовірність його приналежності до шкіри. Цей детектор натренований на 124,7 мільйонах зразків пікселів із бази зображень шкіри людини SFA, і його модель має вигляд:

$$\varphi(x) = a_0 e^{-\|W_0 \cdot (G^P x - c)\|^2} = a_0 e^{-\|R x + B\|^2} \quad (4)$$

де x – вихідний вектор, що кодує колір пікселя; $R = W_0 \cdot G \cdot P$ – матриця повороту та деформації площини проекції відтінків шкіри; $B = -W_0 \cdot c$ – вектор зсуву мат. сподівання ймовірнісного розподілу відтінків кольорів шкіри в точку з координатами $[0,0]$ на проекційній площині. G – матриця повороту розподілу, розрахована алгоритмом PCA; P – оператор проекції векторів кольорів на проекційну площину відтінків; $a_0 = 1$ так як нейронна мережа повинна апроксимувати ймовірності. Для навчання мережі та визначення вектора параметрів розподілу W_0 був використаний метод стохастичного градієнтного спуску Adam з бібліотеки Tensorflow з початковим кроком рівним 0.01 та критерієм оптимізації:

$$W_0 = \operatorname{argmin}_{W_0} \sum_{y_i \in P: p_i > 0} \frac{[p_i - \varphi(y_i, W_0)]^2}{\operatorname{Card}(P) - 1} \quad (5)$$

Застосування детектора шкіри дозволяє стабілізувати у часі знайдені області пікселів шкіри у відеопотоці.

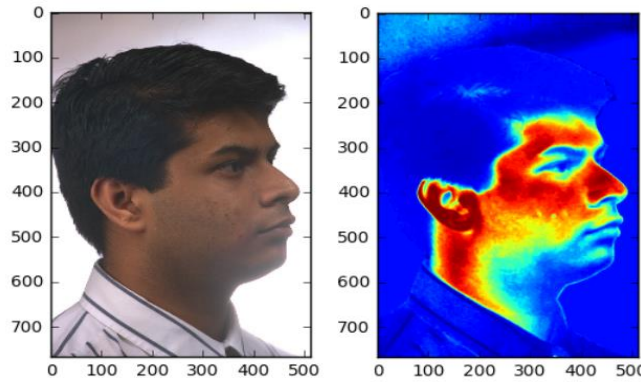


Рисунок 3 – Приклад застосування детектора шкіри: вихідне зображення (ліворуч) та карта ймовірностей пікселів шкіри (праворуч).

Після застосування детектора шкіри, на знайдених пікселях відбувається обрахунок середньозваженого значення інтенсивностей цих пікселів $i_{x,y,z}$ по кожному з каналів $z \in \{R, G, B\}$. Інтенсивність пікселя можна представити як:

$$i_{x,y,z} = i_z + s_{x,y,z} + \eta_{x,y,z}, \quad (6)$$

де i_z – середня освітленість спостережуваного об'єкта, $\eta_{x,y,z}$ – випадкові шуми пікселів камери, $s_{x,y,z}$ – зміна відтінку шкіри, $(x, y) \in M$ – просторові координати пікселя на зображенні M обличчя, z – канал кольору. Хоча $\eta_{x,y,z} \gg s_{x,y,z}$, але $E_{x,y} \eta_{x,y,z} = \eta_z = 0$, тому середньозважене по достатній кількості пікселів шкіри дає змогу знизити рівень шумів $\eta_{x,y,z}$ до значень, де амплітуда корисного сигналу s_z стане більшою за амплітуду шумів $s_z \gg \eta_z$. Звідси шуканий сигнал:

$$E_{(x,y) \in M} (i_{x,y,z} - i_z) = E_{x,y} s_{x,y,z} + E_{x,y} \eta_{x,y,z} = E_{x,y} s_{x,y,z} = s_z \quad (7)$$

У різних частинах спектру оксигемоглобін і гемоглобін поглинають світло по різному, тому між каналами $z \in \{R, G, B\}$ часові ряди $s_R(t)$, $s_G(t)$, та $s_B(t)$, де t – час отримання кадру з камери, проявляють нелінійну залежність. У той же час при зміні освітленості об'єкта $i_R(t)$, $i_G(t)$, та $i_B(t)$ змінюються пропорційно, а при незмінній освітленості – є константами. Підбравши константи $T_z, z \in \{R, G, B\}$ отримаємо $T_R * i_R(t) + T_G * i_G(t) + T_B * i_B(t) = \text{const} \sim 0$. Це дає змогу позбавитися від зміни інтенсивності освітленості об'єкта у часі, при цьому зберегти

варіацію корисного сигналу. Введемо позначення векторів: $\mathbf{s}(t) = (s_R(t), s_G(t), s_B(t))$ та $\mathbf{T}_{RGB} = (T_R, T_G, T_B)$, тоді:

$$\sum_{z \in \{R,G,B\}} E_{(x,y) \in M} T_z * i_{x,y,z} = \sum_{z \in \{R,G,B\}} T_z * E_{x,y} s_{x,y,z} + T_z * i_z + T_z * E_{x,y} \eta_{x,y,z} = \sum_{z \in \{R,G,B\}} T_z * E_{x,y} s_{x,y,z} = \mathbf{T}_{RGB} * \mathbf{s} = \mathbf{s}^*, \quad (8)$$

де \mathbf{s}^* – шуканий спроеційований сигнал, що не залежить від зміни інтенсивності освітленості об'єкта у часі та при цьому зберігає варіацію корисного сигналу ФППГ. Для отримання ряду зміни відтінків шкіри у часі, які не залежать від інтенсивності освітлення у роботі використано метод сліпого поділу джерел ІСА (independent component analysis), тобто аналіз незалежних компонентів. У результаті застосування алгоритму ІСА до рядів $I_z(t)$, з експериментальної вибірки, отримано наступні коефіцієнти оператора $\mathbf{T}_{RGB} = (-0.25, 0.764, -0.285)$. Після даного перетворення отримано часовий ряд відтінків $s^*(t)$, які можуть також містити у собі крім сигналу серцебиття інші шуми у часі, тому у $s^*(t)$ необхідно залишити тільки ту смугу частот, яка відповідає за серцебиття, а всі інші відкинути, як шум.

Комп'ютерна фільтрація нерівномірно дискретизованого часового ряду відтінків шкіри. Під час стаціонарного функціонування, навіть при незмінних зовнішніх умовах, камера час від часу переналаштовується, через що спостерігаються різкі зміни середніх значень пікселів (на 5-10 одиниць за кадр) по окремим каналам кольору (R, G, B). Різка зміна навіть одного каналу при використанні частотних фільтрів вносить значні спотворення, тому потрібно позбутися даних артефактів сигналу.

Запропоновано програмний метод та відповідний алгоритм амплітудно-диференціальної корекції сигналу віддаленої фотоплетизмограми, який слідкуватиме за зміною перших похідних сигналу та у випадку сильних різких змін – згладжуватиме їх наступним чином:

На першому кроці запам'ятовується поточне значення сигналу;

На наступних кроках, результуюче значення сигналу розраховується як:

$$d_i = S_i - S_{i-1}, \quad (9)$$

$$s_i = s_{i-1} + A * \tanh(scale * d_i) \quad (10)$$

де d_i – поточна дельта, S_i – значення сигналу відтінку шкіри для кадру i , A – амплітуда, $scale$ – масштаб функції згладжування дельти d_i , s_i – результуюче значення сигналу для кадру i . У якості функції згладжування дельт сигналу можуть використовуватись $\tanh(scale * d_i)$, сигмоїди, функції вигляду $F(d_i) = A d_i e^{-(scale * d_i)^2}$ тощо. Параметри функції згладжування вибираються таким чином, щоб при відсутності високоамплітудних шумів виконувалося співвідношення $|d_i| < \delta$, і в той же час для самих шумів виконувалося $|d_i| > \delta$. Після амплітудної корекції та лінійної інтерполяція для рівномірної редискретизації сигналу у ІТ був використаний смуговий фільтр ковзного середнього – 61 порядку. Такий порядок зумовлено тим, що ширина смуги частот, яку необхідно залишити у сигналі, займає 1.7-2.8 герца і, відповідно, АЧХ фільтра повинна мати близькі характеристики до ідеального. Вибір було зупинено на сімействі смугових кінцево-імпульсних фільтрів з порядком більшим за 60. При менших порядках у сигналі залишалося багато шумів через занадто полого АЧХ.

Фільтри будувалися бібліотекою `scipy.signal` функцією `firwin`. Характеристики пропускнуї смуги частот отриманого смугового фільтра склали від 0,5 до 3,3 Гц.

Наступним етапом після частотної фільтрації є *отримання розмітки R-піків* на сигналі віддаленої ФПГ. Відфільтрований сигнал має вигляд квазіперіодичної синусоїди ($E[s(t)] = 0$), локальні максимуми якої відповідають моментам скорочення шлуночків серця. Значення RR-інтервалів розраховується як відстань у часі між настанням двох послідовних максимумів у сигналі $s(t)$: $rr_k = t_{2k+1} - t_{2k}$. Якщо $rr_k < \frac{60}{30}$ або $rr_k > \frac{60}{200}$, де 30 і 200 ударів/хв. відповідають за мінімальну та максимальну частоту серцебиття, тоді RR-інтервал відсіюється як помилковий. На основі отриманих RR-інтервалів, розраховуються медичні індекси, що базуються на ВСР, включаючи, але не обмежуючись спектральними індексами, стрес індексом Басвського, індексом централізації тощо.

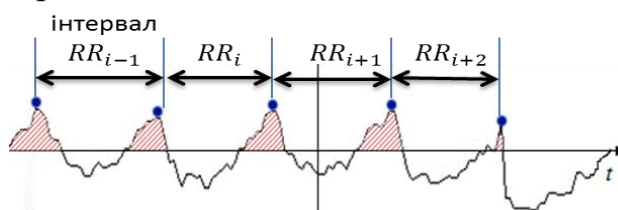


Рисунок 4 – Приклад пошуку RR-інтервалів на відфільтрованому рівномірно дискретизованому часовому ряді відтінків

Експериментальне визначення точності. Для того щоб мати можливість вимірювати те, наскільки точно система визначає моменти скорочень серця, необхідна наявність контрольної послідовності. Еталоном точності вимірювання RR-інтервалів вважається метод Холтера, тому він і використовувався для контролю та оцінки якості. Експеримент складається з двох етапів:

- Піддослідний, що знаходиться в стані спокою, сидячи;
- Піддослідний — після навантаження, у сидячому положенні.

В експерименті використано дві незалежні відеокамери, одна з яких записує нестиснене відео на диск для переналаштування параметрів системи при зміні її компонентів, друга – підключена до досліджуваної системи і в реальному часі обробляє відео, зберігаючи знайдені R-піки в файл. Піддослідний закріпленим пристроєм Холтера, сидить за столом на відстані 50-75 сантиметрів від відеокамер, що сфокусовані на обличчя. У моменти виникнення R-піків, на передній панелі пристрою Холтера, загоряється світловий індикатор. Кожен з етапів для піддослідних триває по 5 хвилин. Під час проведення експерименту піддослідні не виражають ніяких емоцій і не рухають головою. Для визначення граничних умов роботи системи, експеримент може бути повторений при різному освітленні та для різних відеокамер. Також в подальшому може бути вивчено вплив активних рухів голови і міміки різної амплітуди і частоти.

Знаходження еталонної послідовності R-піків у даній роботі проводилося шляхом знаходження положення індикатора шаблоном пошуком і класифікації його стану на кожному кадрі відеозапису. Після зведення рядів R-піків з ІТ та еталонного ряду, отримано наступний графік амплітуди від часу:

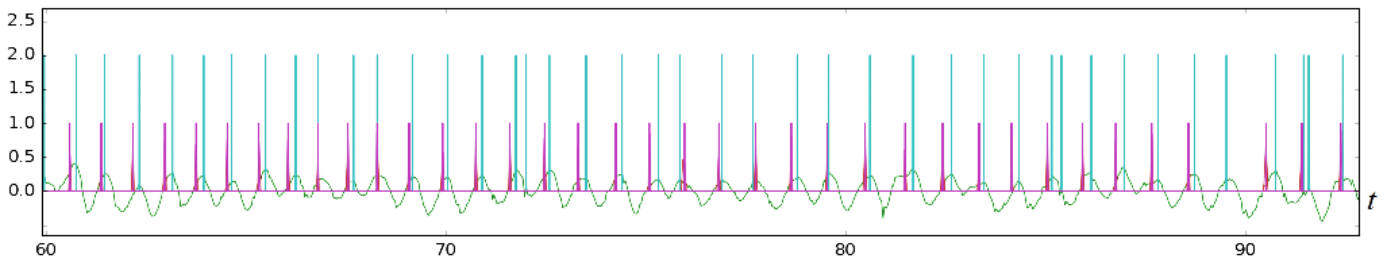


Рисунок 5 – Приклад отриманих R-піків з пристрою Холтера (піки одиначної висоти) та з ІТ (піки подвійної висоти). Неперервний квазіперіодичний графік показує віддалену ФПГ

Як видно з графіку деякі піки, отримані з ІТ, випереджають або відстають від піків еталонного ряду. Також можна помітити, що присутні зайві піки та інколи зустрічаються пропуски. Тому виникає необхідність синхронізувати отримані ряди та розрахувати їх подібність. Для цього використано критерій Q .

Оптимальна ідентифікація подій у сигналі та аналіз якості системи. Враховуючи той факт, що послідовність $B(l)$ моментів виникнення подій, які знаходить ІТ, залежить від порядку l частотного фільтра, то критерій приймає наступний вигляд:

$$Q(A, B(l)) = \frac{Acc(A, B(l))}{1 + RMSE_Z(A, B(l))}, \quad (11)$$

Маючи з експериментів еталонні послідовності R-піків A_k (з Холтера), для покращення точності розробленої ІТ, було прийнято рішення оптимізувати систему по l . Задача пошуку оптимальних l за критерієм $Q(A, B(l))$ формулюється наступним чином: маючи множину еталонних послідовностей, експериментально отриманих з холтера, знайти таке значення параметру l , яке максимізує $E_k[Q(A_k, B_k(l))]$, де $B_k(l)$ – послідовність R-піків, отримана за допомогою ІТ при обробці відео k -того експерименту з використанням l у якості порядку частотного фільтра. Для вирішення цієї задачі розроблено підсистему показану на рисунку 6.

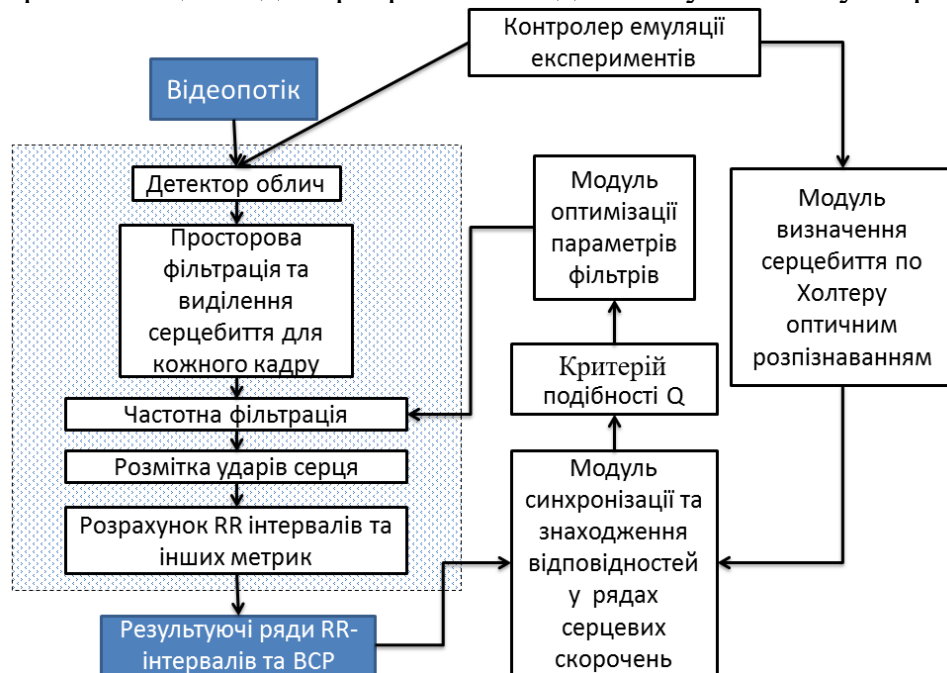


Рисунок 6 – Підсистема для налаштування параметрів модулів ІТ

У першій реалізації ІТ, порядок частотного фільтра був рівний 31 (затримка 1 сек.), що після проведення експериментів і розрахунку критерію якості видало наступні результати:

Таблиця 1. – Результати співставлення R-піків з розробленою ІТ і холтера

	У стані спокою	Після навантаження
RMSEz (sec)	0,083	0,095
miss_in_A:	8,33%	5,99%
odd_in_B:	8,54%	7,32%
Corresponding ids:	91,66%	94,00%
Accuracy:	84,43%	87,50%
Recall:	91,66%	94,00%
Final quality metric Q:	77,92%	79,91%

Де miss_in_A – це відсоток пропусків, а odd_in_B – відсоток хибних спрацювань. Corresponding_ids – показує співвідношення кількості нормальних подій до кількості еталонних подій у послідовності A. ІТ знаходить близько 92% всіх скорочень серця, та її точність з урахуванням хибних спрацювань складає 85%. Критерій якості Q, який також враховує розходження у часі між знайденими скороченнями серця у відеосигналі та R-піками Холтера, складає 79%. Такі результати зумовлені тим, що при заданому порядку фільтра у відфільтрований сигнал частково потрапляють шуми, які впливають на форму сигналу і відповідно на дисперсію розподілу знайдених піків, через що збільшується $RMSE_z$. Розподіли похибок для співпадаючих подій показано на рисунку 7.

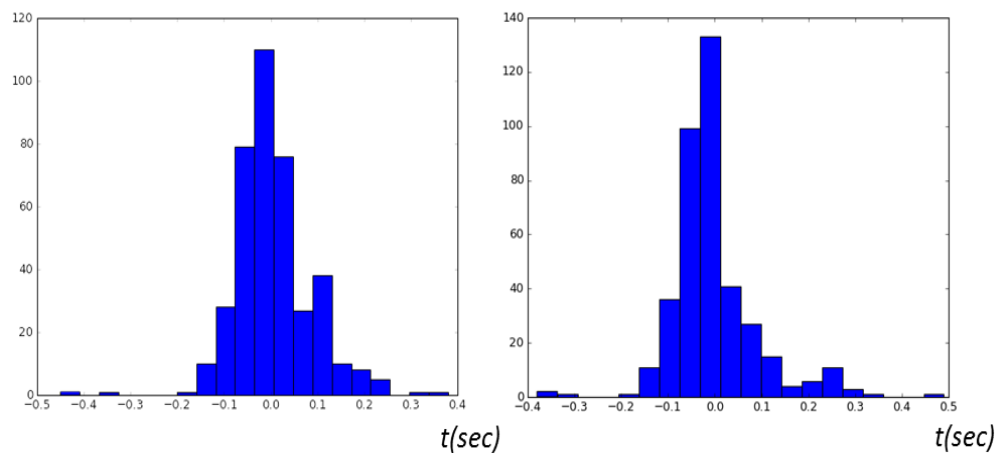


Рисунок 7 – Розподіли похибок δ_z для співпадаючих подій
а) ліворуч – після навантаження та б) праворуч – у стані спокою

У експериментах після навантаження – розходження у часі між нормальними подіями (гістограма зліва) складають: $RMSE_z = 0.0948$ секунди. Розходження між нормальними подіями у спокої (гістограма праворуч) – $RMSE_z = 0.083$ секунди. Так як необхідно отримати високу точність та систему реального часу, то виникає мінімаксна задача оптимізації по l (див. рисунок 8):

$$l \rightarrow \min, \quad \text{чим довший фільтр, тим більша затримка,}$$

$$Q(A, B(l)) \rightarrow \max \quad \text{зацікавлені у найвищій досяжній якості.}$$

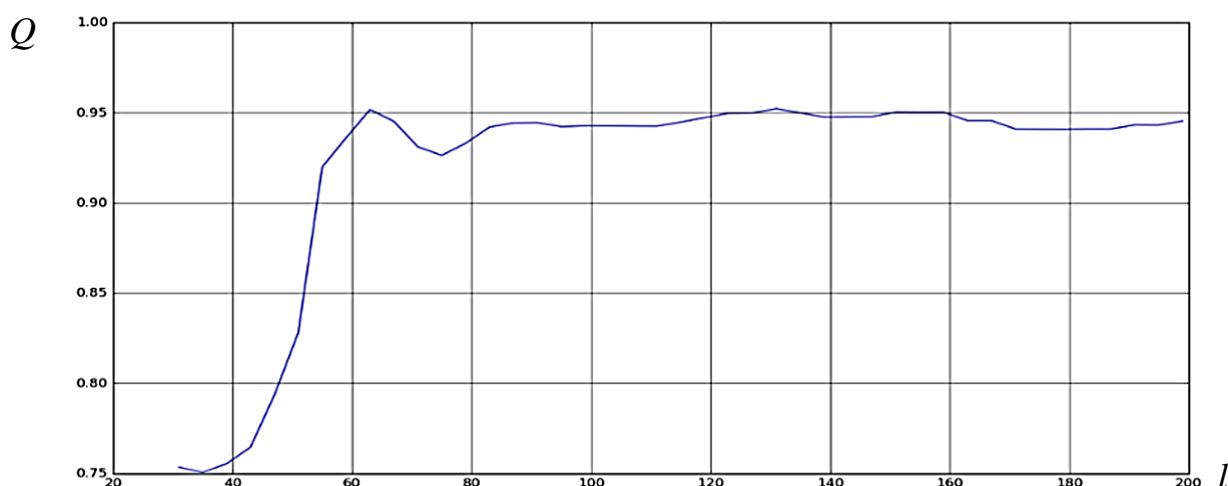


Рисунок 8 – Графік залежності якості системи від порядку фільтра l

Запустивши розрахунок критерію по всій вибірці для фільтрів різних порядків, отримуємо, що оптимальне значення порядку фільтра рівне 61 (затримка 2 сек). Отримані результати наведено в таблиці нижче. Для порівняння виведено результати для порядків 61 та 131.

Таблиця 2. -Точність ІТ після оптимізації

	Довжина фільтра 61	Довжина фільтра 131
RMSEz (sec)	0,0523	0,0401
miss_in_A:	0,69%	0,00%
odd_in_B:	1,38%	0,95%
Corresponding ids:	99,30%	100,00%
Accuracy:	97,94%	99,04%
Recall:	99,31%	100,00%
Final quality criterion Q:	93,07%	95,23%

Показано, що ІТ при порядку фільтра 61 (затримка 2 сек.) знаходить 99,31% всіх скорочень серця, та її точність з урахуванням хибних спрацювань складає 97,94%. Критерій якості Q , складає 93,07%. При використанні частотного фільтра з порядком 131 (затримка 4.37 сек), ІТ знаходить усі скорочення серця, і має точність 99,04%. Критерій Q при цьому рівний 95.23%. Знайдені оцінки моментів виникнення R-піків на віддаленій ФПГ по відношенню до замірів R-піків з ЕКГ, відхиляються у середньому на $RMSEz = 0.048$ секунди, що значно краще, ніж у неоптимізованому варіанті.

У четвертому розділі створено високорівневу архітектуру та представлено принципи функціонування ІТ для безконтактного знаходження ВСР людини на прикладі побудови сервісу для страхової медицини. Страхові компанії зацікавлені у нових інструментах, що дозволять їм більш точно та в більш повному об'ємі отримувати інформацію про стан своїх клієнтів. Суть сервісу полягає у тому, щоб виявляти якомога раніше хвороби та стани людей, що можуть призвести до настання страхових випадків, шляхом дистанційного безконтактного постійного моніторингу ВСР за допомогою розробленої ІТ аналізу віддаленої ФПГ з широко розповсюджених веб-камер, без необхідності втручання у розпорядок цих людей. У дисертації створено та детально пояснено загальну структуру сервісу (рисунок 9) як для комерційного так і для некомерційного використання:

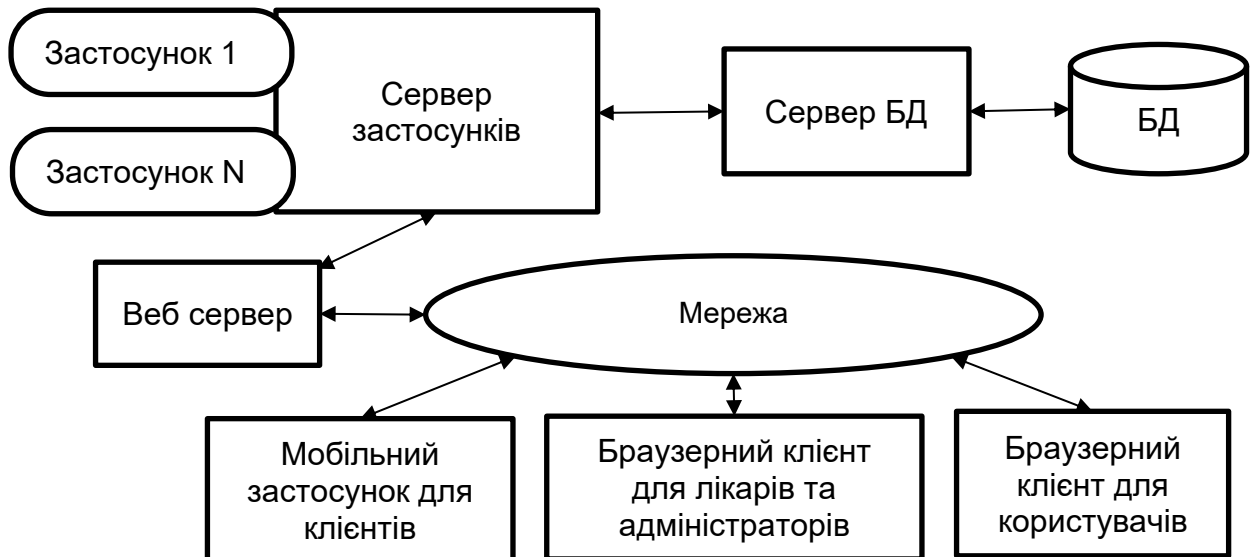


Рисунок 9 – Високорівнева структура сервісу страхової медицини на базі запропонованої ІТ

У даній структурі мобільний застосунок і браузерне рішення для користувачів є важкими клієнтами, які здійснюють обробку відео на пристроях користувачів, а на сервера відправляють потік моментів скорочення серця та RR-інтервали. Отримані від користувачів дані про серцеву активність зберігаються у базі даних і потім аналізуються за допомогою серверних застосунків. Ці застосунки розраховують необхідні для лікарів індекси та проводять попередню діагностику на наявність випадків, що потребують термінової уваги. Обґрунтовано вибір компонентів для створення комплексного рішення, у вигляді веб-орієнтованої архітектури з RESTful API та важким клієнтом у вигляді мобільного застосунку, чи веб-сторінки. Вибір важкого клієнта, який здійснює обробку відео на пристрої користувача та може працювати автономно при відсутності мережі зумовлено тим, що для отримання ФПГ з достатньою якістю, необхідно отримувати та обробляти відеопотік з якомога більшим бітрейтом і частотою кадрів. При цьому бажано цей потік не стискати, так як сучасні кодеки стискаючи відео – безвідмовно втрачають частину інформації. Після обробки відео важкий клієнт перешле на сервера сервісу вже готовий сигнал ФПГ. На рисунку 10 наведено структуру важкого клієнта:

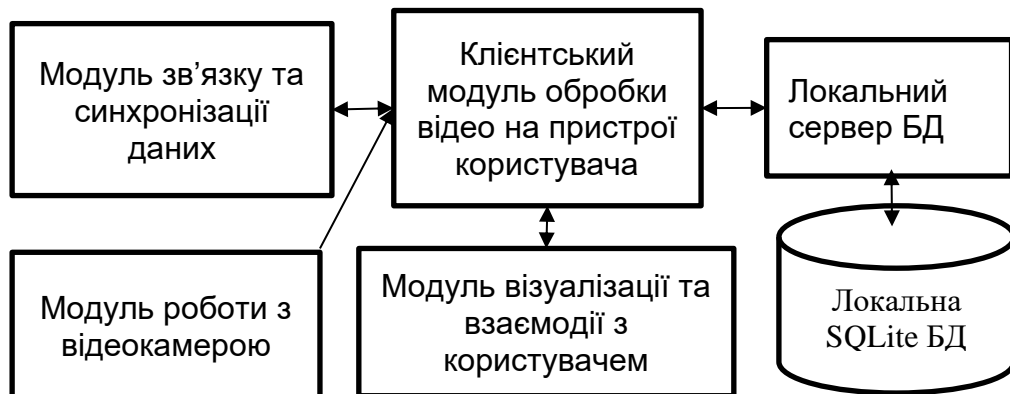


Рисунок 10 – Структура автономного важкого клієнта

Детально описано функціонування та розробку сервісу, розглянуто основні типи користувачів, а саме: клієнти страхової компанії, лікарі та адміністратори, та описані основні сценарії використання ІТ. Користувачі взаємодіють з сервісом шляхом встановлення застосунку у вигляді важкого клієнта собі на пристрій (телефон, планшет, ноутбук) і здійснюють дистанційний моніторинг за допомогою камери пристрою (наприклад, під час роботи чи відпочинку за комп'ютером). Зібрані дані за час моніторингу накопичується на серверах та у випадку необхідності проглядаються лікарями. Взаємодія лікарів з системою відбувається через браузерний клієнт для лікарів, де вони можуть проглядати дані, давати рекомендації, а також перевіряти рівень ризику погіршення стану здоров'я кожного з клієнтів для страхової компанії. У підрозділі наведено та детально описано основні компоненти, діаграми розгортання та діаграми послідовностей сервісу, протоколи взаємодії клієнтів з сервером. У додатках наведено та описано діаграму основних класів важкого клієнта та сервера. Розглянуто технологічні та технічні аспекти реалізації, включаючи вибір мов Python і C# та розробку у середовищах PyCharm та VisualStudio 2015. Наведені аспекти вибору систем управління базами даних, а саме Mysql для сервера, – через відкритість і доступність, та SQLite для клієнта, – в основному через зручність роботи. Крім цього, зазначені технологічні аспекти навчання власних детекторів облич за допомогою бібліотеки OpenCV і способи швидкого тренування детекторів облич.

Експериментальні дослідження інформаційної технології. Випробування ІТ проводилися для аналізу внутрішнього стану 89 студентів кафедри ММСА, ІПСА. Кожен запис експерименту тривав 4-7 хвилин за 2 дні до, та безпосередньо під час екзамену. Як приклад, на рисунку 11 показано сигнал фотоплетизмограми студентки до (верхній графік) та після частотної фільтрації (нижній графік), отриманий за допомогою розробленої ІТ.

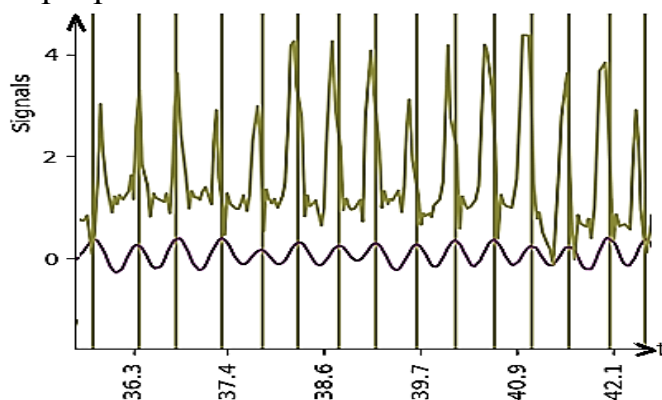


Рисунок. 11 – Сигнали серцебиття студентки до(верхній графік) та після фільтрації (нижній графік) залежно від часу

Стрес індекс студентки знаходився на рівні 130 умовних одиниць (у нормі індекс знаходиться у межах 10-40). Було показано, що система коректно визначила пульс і рівні стресу студентів. Також після детального аналізу знятих ФПГ сигналів системою, було встановлено їх якість і зроблено висновки про те, що отримані результати експериментів – достовірні.



Рисунок 12 – Ілюстрація інтерфейсу з ВСР водія автомобіля (ліворуч) та тракториста-механізатора (праворуч)

ІТ показала працездатність при кріпленні камери у салоні автомобіля для спостереження за станом водіїв (рисунок 12). З бажаних модифікацій – мати відео камеру, в якій є можливість програмно керувати налаштуваннями контрасту. У тестуванні ІТ також приймали участь декілька трактористів-механізаторів у польових умовах на тракторах різних моделей. Випробування показали, що можливо отримувати сигнал і в таких умовах, але вимоги до камери стають більш жорсткими. Було виявлено кореляцію самопочуття водіїв і трактористів зі стресом, оціненим за методикою Баєвського з RR-інтервалів, які видала розроблена система. Іншим класом застосування є використання розробленої ІТ для обробки збереженого відео в офлайн режимі. Це дає можливість аналізувати записи різних подій та історичних моментів. Як приклад, у роботі аналізувалися студійні відеозаписи півторагодинних дебатів кандидатів у президенти США Д. Трампа та Х. Клінтон у ході президентської кампанії 2016 року з фіксацією пульсу, ВСР і рівня стресу (див. рисунок 13).



Рисунок 13 – Приклад обробленого запису дебатів Д. Трампа та Х. Клінтон.

При впровадженні роботи в Київській міській лікарні №6 проводилися численні експерименти зняття ВСР і стресу як у медичних працівників так і у пацієнтів медичного закладу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу створення інформаційної технології дистанційного безконтактного отримання варіабельності серцевого ритму людини з використанням відеопотоку звичайних веб-камер. Це дозволяє, не порушуючи звичного ритму життя, роботи і відпочинку, забезпечити належний рівень контролю здоров'я серця шляхом постійного моніторингу ВСР та її подальшої комп'ютерної обробки методами сучасної аналітики і штучного інтелекту. Проведені дослідження дозволили отримати нові наукові результати, які мають істотні переваги перед існуючими, а саме:

1. Вперше запропоновано програмний метод амплітудно-диференціальної корекції сигналу віддаленої фотоплетизмограми на основі комп'ютерного аналізу динаміки зміни відтінків шкіри у часі, що дозволяє позбутися розривів сигналу при зміні внутрішніх станів веб-камери та покращити якісь віддаленої ФПГ, тим самим розширивши сферу застосування ІТ.

2. Подальшого розвитку отримав метод ймовірнісного детектування пікселів шкіри у вигляді нейронної мережі на основі радіально-базисних функцій, що відрізняється від існуючих використанням незалежної від освітленості проєкційної площини, та дає можливість оцінювання ймовірності приналежності кожного пікселя зображення до шкіри. Зібрано навчальну вибірку з 124,7 мільйонів відтінків шкіри, на яких проведено параметричну ідентифікацію ймовірнісного детектора шкіри. Також зібрано вибірку з 95 200 зображень на яких натреновано детектор обличчя на каскадах Хаара, що має точність 99,27%. Разом з алгоритмом стабілізації обличчя, детектор шкіри дозволяє знизити рівень шумів системи.

3. Запропоновано новий критерій оцінювання подібності двох різновимірних послідовностей подій, і відповідний метод обчислення їх схожості на підставі розбиття подій у цих послідовностях на класи еквівалентності, що дозволяє оцінювати точність знаходження моментів скорочення серця з ФПГ по відношенню до еталонного ряду, отриманого з ЕКГ, та розрахувати якість створеної ІТ.

4. Вперше створено інформаційну технологію безконтактного визначення варіабельності серцевого ритму, особливість якої полягає у використанні для дистанційного безконтактного моніторингу стану людини, розподіленій обробці даних, інтелектуальному розпізнаванні образів, можливістю реалізації на доступних технічних засобах (звичайних веб-камерах) і досягненні обґрунтованого рівня точності.

5. На основі створеної ІТ, реалізовано систему безконтактного визначення ВСР та підсистему для відтворення експериментів з відеозаписів і ЕКГ. Завдяки чому стало можливим багаторазово тестувати ІТ з різними налаштуваннями для покращення якості, без необхідності проведення повторних експериментів. Експериментально показано, що ІТ при порядку частотного фільтра 131 (затримка 4.37 секунди), знаходить усі скорочення серця, і має точність 99,04%. Стандартне відхилення оцінок моментів скорочень серця, визначених системою, по відношенню до еталонної ЕКГ рівне 0.048 секундам.

6. Створена ІТ випробувана у ситуаціях керування транспортними засобами на водіях та трактористах. Показано наявність кореляції між втомою водіїв і рівнем стрес індексу, отриманим з ВСР під час відеоспостереження. Проводилися заміри

BCP на 89 студентах під час сесії, що виявили високий рівень стресу студентів. Виявлено можливість отримання BCP зі студійних записів.

Запропоновано веб-орієнтовану архітектуру для сервісу по страховій медицині. Створену ІТ впроваджено у Київській міській лікарні №6. Основний результат роботи також використаний у рамках виконання Європейського проекту FP7 NIMSPPS.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Nikolaiev S., Metric and Algorithm for Similarity Calculation Between Two Temporal Event Sequences // Системні дослідження та інформаційні технології, 2017, pp. 137-145. Особистий внесок: розробка алгоритму та критерію подібності двох різновимірних послідовностей подій. (Index Copernicus)

2. Николаев С., Тимошенко Ю., Прогнозирование потребления электроэнергии с помощью нейронных сетей // Системні дослідження та інформаційні технології, 2014, №4, с.75-86. Особистий внесок: розробка архітектури нейронної мережі та способу відбору інформативних ознак. (Index Copernicus)

3. Ніколаєв С., Тимошенко Ю., Матвіїв К., Вплив навчальної вибірки на якість детектора облич на ознаках Хаара // Наукові вісті НТУУ «КПІ» 6/2017, с.38-46. Особистий внесок: побудова детектора облич та дослідження його якості залежно від компонування навчальної вибірки. (PINЦ, WorldCat)

4. Nikolaiev S., Vedmedenko O., Tymoshenko Y., 3D-Model Reconstruction With Use of Monocular RGB Camera // Системні дослідження та інформаційні технології, №4, 2017. pp. 20-28. Особистий внесок: дослідження застосовності сучасних монокулярних методів 3Д реконструкції облич для покращення зняття сигналу серцебиття. (Index Copernicus)

5. Nikolaiev S., Chereda H., Tymoshenko Y., Sampling rate independent filtration approach for automatic ECG delineation // International Scientific Journal "Internauka", №5, April 2017, [Електронний ресурс], Режим доступу: <http://www.internauka.com/issues/2017/5/2394> Особистий внесок: побудова алгоритму фільтрації для розмітки R-піків на кардіограмах. (іноземне видання)

6. Nikolaiev, S., Giurgiu, I., Bogojeska J., Analysis of labor efforts and their impact factors to solve server incidents in datacenters // Proceedings – 14th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid Computing, CCGrid 2014, pp. 424-433. Особистий внесок: проведення аналізу впливу різних факторів, таких як тип несправностей та їх складність, рівень стресу та втома персоналу на кількість трудових зусиль необхідних для вирішення сервісних інцидентів у центрах обробки даних.

7. Nikolaiev S., Tymoshenko Y., Reinvention of the Cardiovascular Diseases Prevention and Prediction Due to Ubiquitous Convergence of Mobile Apps and Machine Learning // Information Technologies in Innovation Business Conference (ITIB), IEEE, 7-9 Oct. 2015, Kharkiv, Ukraine, pp 23-27. Особистий внесок: аналіз проблем сучасної медицини та задач ПППМ.

8. Nikolaiev S., Telenyk S., Tymoshenko Y., Human stress detection using non-contact remote photoplethysmography from video stream // Proc. of 3rd Conf. on Inf. Tech. (itsrcp18), Krakow, Poland, July 2-5, 2018. pp. 10-22. Особистий внесок: розробка структури інформаційної технології для безконтактного дистанційного вимірювання ВСР.

9. Nikolaiev S., Chereda G., Automatic annotation of digitized ECG signals with wavelets // Збірник праць 17-th International conference on System Analysis and Information Technology (SAIT), Kyiv, 22–25 June 2015p., pp. 27-29. Особистий внесок: розроблено метод автоматичної анотації кардіограм за допомогою вейвлетів.

10. Nikolaiev S., Malinovskiy A., Classification of the ECG features for automatic heart diseases detection // Збірник праць 17-th International conference on System Analysis and Information Technology (SAIT), Kyiv, 22–25 June 2015p., pp. 131-133. Особистий внесок: аналіз типів та проведення класифікації ознак, які можна отримати з ЕКГ для створення автоматичної системи виявлення ССЗ.

11. Nikolaiev S., Architecture of automatic machine learning system for heart pathologies detection using ECGs // Збірник праць конференції Обчислювальний інтелект (CompInt 2015) Черкаси, 2015, с. 158-160. Особистий внесок: розробка архітектури системи для автоматичного виявлення ССЗ на основі даних ЕКГ з використанням машинного навчання.

12. Nikolaiev S., Malinovskiy A., The Architecture of a mobile system for heart health monitoring // Збірник праць 17-th International conference on System Analysis and Information Technology SAIT 2016, pp 307-309. Особистий внесок: розробка архітектури мобільного додатку для віддаленого моніторингу здоров'я серця.

13. Ніколаєв С., Системний підхід застосування інноваційних інформаційних технологій для вирішення задач персоналізованої, прогностичної та профілактичної медицини // Збірник праць V Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наукові дослідження: перспективи інновацій у суспільстві і розвитку технологій», Харків, 14-15 березня 2017 р., с 78-82. Особистий внесок: розробка системного підходу вирішення задач ПППМ шляхом використання ІТ моніторингу ВСР.

14. Nikolaiev S., Chereda H., Comparison of resampling techniques and its effect on real time filtration of non-uniformly sampled bio-signal time series // Збірник праць 19-th International conference on System Analysis and Information Technology (SAIT), Kyiv, 22–25 May 2017p., pp. 228-230. Особистий внесок: реалізація методів ресемплінгу нерівномірно дискретизованих багатовимірних рядів біосигналів та проведення порівняння якості цих методів.

15. Ніколаєв С., Інформаційна технологія з використанням комп'ютерного зору та обробки біосигналів для знаходження варіабельності серцевого ритму людини // Збірник праць XIII Міжнародної наукової конференції, «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2017)» 22–26 травня 2017, с 117-118. Особистий внесок: розробка структури інформаційної технології для дистанційного безконтактного вимірювання ВСР.

16. Ніколаєв С., Інформаційна технологія надання сервісу моніторингу варіабельності серцевого ритму людини // Збірник праць V Міжнародної наукової

конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні 2017» (Київ, 22-23 червня 2017) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://index.pkr.sfu.ca/index.php/browse/index/410> Особистий внесок: проектування сервісу моніторингу ВСР безконтактним способом.

17. Ніколаєв С., Інформаційна технологія для виявлення варіабельності серцевого ритму людини з відеопотоку // Збірник праць VI Міжнародної наукової конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ-ОДЕСА-2017) (Одеса, 20 – 22 вересня 2017). pp 262-265. Особистий внесок: розробка ІТ для виявлення ВСР з відеопотоку.

18. Sergii Nikolaiev, Yevheniia Braslavska, Comparison Of Existing Face Recognition Methods And Systems // „Science And Technology Of The XXI Century” Матеріали XVIII Всеукраїнської Студентської Науково – Практичної Конференції (07 грудня 2017р.) p 44-46. Особистий внесок: проведення порівняння різних алгоритмів розпізнавання людей по даним зображенням їх облич.

19. Nikolaiev S., Vedmedenko O., Tymoshenko Y., 3D-Model Reconstruction with Use of Monocular RGB Camera // V International scientific conference "Global and Regional problems of Informatization in Society and Nature Using, 2017", 22-23 June 2017, NULES of Ukraine, Kyiv, pp. 45-46. Особистий внесок: огляд монокулярних методів 3Д реконструкції облич.

20. Nikolaiev S., Tymoshenko Y., RBF Neural Network Probabilistic Skin Color Detector for Real-Time Video Applications // 20-th International conference on System Analysis and Information Technology (SAIT), Kyiv, May 21–23, 2018, pp. 113-115. Особистий внесок: розробка ймовірнісного детектора шкіри на радіально-базисній нейронній мережі.

АНОТАЦІЯ

Ніколаєв С. С. Інформаційна технологія безконтактного дистанційного визначення варіабельності серцевого ритму людини з відеопотоку – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертацію присвячено створенню інформаційної технології обробки відео з широко розповсюджених веб- та інших відеокамер для безконтактного дистанційного вимірювання варіабельності серцевого ритму, яка дасть можливість людині без зміни розпорядку та стилю її життя, забезпечити належний рівень здоров'я серця. Дана задача є надзвичайно актуальною у парадигмі персоналізованої, прогностичної та профілактичної медицини, що передбачає постійне спостереження за станом серця людини ще до виникнення будь-яких проявів хвороби. У дисертації при створенні ІТ вирішено такі основні задачі: стабільне знаходження облич у відеопотоці; розробка ймовірнісного детектора пікселів шкіри; отримання сигналу зміни відтінку шкіри у часі; програмне подавлення шумів у сигналі амплітудно диференційною корекцією та подальшою частотною фільтрацією кінцевоїмпульсним фільтром; розмітка моментів

скорочення серця на сигналі віддаленої фотоплетизмограми та їх валідація. Запропоновано новий критерій оцінювання подібності двох різновимірних послідовностей подій, і відповідний метод обчислення їх схожості на підставі розбиття подій у цих послідовностях на класи еквівалентності. На базі ІТ реалізовано систему дистанційного безконтактного знаходження ВСР та спроектовано сервіс страхової медицини. Основний результат роботи використаний у рамках виконання Європейського проекту FP7 NIMSPPS.

Ключові слова: інформаційна технологія, розподілена обробка даних, інтелектуальне розпізнавання образів, обробка відеопотоку, нейронні мережі, різновимірні часові ряди, фотоплетизмографія, безконтактний моніторинг, варіабельність серцевого ритму, ПППМ.

АННОТАЦИЯ

Николаев С. С. Информационная технология бесконтактного дистанционного определения вариабельности сердечного ритма человека из видеопотока – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Информационные технологии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена созданию информационной технологии обработки видео с широко распространённых веб и других видеокамер для бесконтактного дистанционного измерения вариабельности сердечного ритма, которая позволит человеку без изменения распорядка и стиля его жизни, обеспечить надлежащий уровень здоровья сердца. Данная задача является чрезвычайно актуальной в парадигме персонализированной, прогностической и профилактической медицины, предусматривая постоянное наблюдение за состоянием сердца человека ещё до возникновения любых проявлений болезни. В диссертации при создании ИТ решены следующие основные задачи: стабильное нахождение лиц в видеопотоке; разработка вероятностного детектора пикселей кожи; получения сигнала изменения оттенка кожи во времени; подавление шумов амплитудно-дифференциальной коррекцией и частотной фильтрацией конечно импульсным фильтром; разметка моментов сокращения сердца на сигнале удалённой фотоплетизмограммы и их валідація. Предложен новый критерий оценки сходства двух разноразмерных последовательностей событий, и соответствующий метод вычисления их похожести на основании разбиения событий в этих последовательностях на классы эквивалентности. На базе ИТ реализовано систему дистанционного бесконтактного нахождения ВСР и спроектирован сервис страховой медицины. Основной результат работы использован в рамках выполнения Европейского проекта FP7 NIMSPPS.

Ключевые слова: информационная технология, распределённая обработка данных, интеллектуальное распознавание образов, обработка видеопотока, нейронные сети, разноразмерные временные ряды, фотоплетизмография, бесконтактный мониторинг, вариабельность сердечного ритма, ПППМ.

SUMMARY

Nikolaiev S. **Information technology for human heart rate variability remote non-contact determination from video stream** – Manuscript.

A Philosophy Doctor of Technical Sciences thesis in specialty 05.13.06 – Information technologies. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to creation of the modern video processing information technology that uses widely distributed web- and other video cameras for contactless remote measurement of heart rate variability that might provide an adequate level of heart health without changing person's lifestyle and schedule. This task is extremely important for personalized, prognostic and preventive medicine paradigm, which is a global trend in the 21st century that stands for constant human heart monitoring before any illness have been detected.

In the dissertation during the process of research and IT creation the following tasks have been solved: finding stable faces' coordinates on the frames, taken from the webcam video stream; developing probabilistic skin detectors that with the help of RBF neural networks are capable of separating facial skin pixel mask and the background of the frames; obtaining the signal of skin tint change in a form of time series that capture slight fluctuations of oxygenated blood spectral characteristics during each heartbeat cycle; applying amplitude differential correction for removing cameras frame-to-frame adaptation ripples and blind source separation methods to find a projected component of skin tint signal to luminance independent plane that corresponds to rPPG signal; resampling of unevenly sampled raw rPPG signal and its further frequency filtration with a finite impulse response filter for noise reduction; annotating R-peaks that correspond to the moments in time of heart beats on the filtered rPPG signal and validating them for obtaining RR intervals.

A newly proposed similarity criterion Q is used for estimating the time series of heart contractions moments (R-peaks) annotation accuracy compared to the reference series obtained from Holter monitor device in clinical conditions. During experimental phase people had been sitting in front of cameras with put on Holter monitoring device and as the result simultaneously two datasets were recorded: R-peaks from developed IT with corresponding high-quality video and R-peaks from Holter monitor ECG. People of different age groups and genders participated in experiment. Experiment were repeated for calm condition and immediately after 5 minutes of physical exercises. This setup allows to evaluate the quality and adjust the parameters of the proposed IT. The results of final finetuned developed system show high accuracy of individual heart contractions recognition in time and thus high quality of obtained HRV.

Developed IT can be used, for example, in insurance medicine providing SaaS solution to enable early prediction and prevention of health issues and therefore greatly reduce insurance cases and losses. The essence of the service is to detect as soon as possible the (pre)illness conditions of insurance company clients via remote constant rPPG monitoring. The web-based service with thick client using the proposed information technology was designed for these insurance companies. The thick client in the developed IT is used to process video stream from widely distributed webcams on clients' devices and to perform rPPG analysis, enabling remote contactless continuous geographically

distributed HRV monitoring service. The general architecture and the implementation details, including database structure, classes diagrams, communication protocols of the service for both commercial and non-commercial use are presented in the thesis. This approach allows to get additional source of information and better reevaluate risks.

The experimental evaluations of the proposed system were conducted on car drivers during intercity rides where strong correlations of stress index and tiredness levels were found depending on route length. Experiments were conducted on farmers during tractor driving in the field that has also shown correlations with farmers' internal states and as the result it can be stated that in this case more specialized cameras are needed to cope with noise from tractor vibrations.

Another set of experiments was conducted on students before and during exams for stress testing. It was shown that behind poker faces of students – some of them experience extraordinarily high stress while other are not stressed at all. Questionnaire of these students has proved that measurements of the system are in accordance with what students were experiencing during the experiment. It was clearly shown that experienced professor who was conducting the exam could not distinguish internal state of some students with mere external visual observation. Also, one set of experiments was related to extracting rPPG signal from recorded videos. It was successfully shown during analysis of D. Trump and H. Clinton debates video recordings that it is possible to retrieve rPPG signals having high quality video source.

Key words: information technology, distributed data processing, intellectual pattern recognition, video stream processing, neural networks, time series with different dimensions, photoplethysmography, contactless monitoring, heart rate variability, PPPM.